

Ermittlung des Einflusses der Infrastruktur auf die Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs für den Verkehrsträger Schiene

THOMAS SIEFER

Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb,
TU Braunschweig, Pockelsstr. 3, D-38106 Braunschweig

Zuverlässigkeit im Sinne von Gleichheit zwischen geplanter und tatsächlicher Ankunftszeit von Zügen ist im Schienenverkehr ein zentraler Qualitätsparameter. Das Phänomen der Zuverlässigkeit ist für den Fahrgast im Personenverkehr oder Verlader im Güterverkehr leicht messbar, ein einfacher Vergleich zwischen Soll- und Ist-Zeit. Aus verkehrlicher Sicht steht im Vordergrund, dass individuell zusammengestellte umsteigebehaftete Reiseketten (insbesondere im Personenverkehr) aus verschiedenen Gründen unterbrochen werden können und dass somit die Zuverlässigkeit dieser Reiseketten individuellen Bewertungsmaßstäben unterliegen. Aus betrieblicher Sicht (der Infrastruktur- und Eisenbahnverkehrsunternehmen) steht dabei im Vordergrund, dass im System Schiene – aufgrund seines spurgeführten Netzcharakters – initial auftretende Störungen des Bahnbetriebs vielfältiger Art Folgestörungen in verschiedensten räumlichen und zeitlichen Ausprägungen zum Ergebnis haben können.

Aus eisenbahnbetrieblicher Sicht steht für das fahrplanbasierte System Schiene die adäquate Erfassung von ursprünglichen Störungen (sogenannten Urverspätungen) und den daraus ableitbaren Folgeverspätungen im Vordergrund. Folgeverspätungen umfassen dabei im Wesentlichen

- weitere Verspätungen des von der Urverspätung betroffenen Zuges,
- Verspätungen anderer Züge, die warten, um Umsteigebeziehungen aufrecht zu erhalten,
- Verspätungen anderer Züge, die sich aus Kapazitätsrestriktionen der Infrastruktur (Strecken, Knoten u.a.) ergeben.

Eine nachfrageorientierte verkehrliche Sichtweise betont insbesondere den Aspekt der Umsteigevorgänge. Insbesondere im Personenverkehr ist nicht nur die Zuverlässigkeit einzelner Züge von Bedeutung, sondern als Konsequenz auch die Zuverlässigkeit einer Kette von Zügen (sog. „Reisekette“).

* Der Vortrag wurde am 11.04.2014 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

Bei der Erklärung der Zuverlässigkeit steht dabei der funktionale Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit (Ergebnisgröße) sowie der Eisenbahninfrastruktur, dem Betriebsprogramm und anderen Faktoren im Mittelpunkt.

- Die Infrastruktur eines Bahnsystems in Form von Strecken und Bahnhöfen, Leit- und Sicherungstechnik, Energieversorgung sowie anderen bautechnischen Elementen kann selbst Ursache von Störungen sein (Funktionsstörungen an Signalen oder Weichen, der Oberleitung usw.). Die Infrastrukturausstattung jedoch kann auch selbst ein wichtiger Indikator für den Auf- oder Abbau von Verspätungen (Anzahl der Haltegleise in einem Bahnhof, Streckenhöchstgeschwindigkeiten, Leit- und Sicherungstechnik, Überholgleise auf der Strecke usw.) sein.
- Das Betriebsprogramm (Anzahl der Fahrten nach Zuggattungen, Reihenfolge und Geschwindigkeit der Züge, Haltemuster, Anschlussregeln usw.) kann ebenfalls den Auf- oder Abbau von Verspätungen erheblich beeinflussen. Das Betriebsprogramm hat durch die Konstruktionsregeln für die Erstellung eines Fahrplans sehr weitreichenden Einfluss auf den Verspätungsaufbau bzw. den Verspätungsabbau. Insbesondere kann hier sehr kurzfristig durch Fahrplanänderungen reagiert werden, wenn sich zeigt, dass ein Betriebsprogramm sehr unzuverlässig ist.
- Weitere Faktoren können insbesondere für Störungen (Urverspätung) von Bedeutung sein, z.B. die Anzahl der zu- und aussteigenden Fahrgäste an einem Bahnhof, Wetterbedingungen oder die Verfügbarkeit von Fahrzeugmaterial.

Die Bundesverkehrswegeplanung untersucht die Effekte von Infrastrukturinvestitionen, daher kommt dem Einfluss der Infrastruktur auf die Zuverlässigkeit eine wichtige Bedeutung zu. Da für das herangezogene Prognosejahr 2030 aber auch mit höheren Zugzahlen zu rechnen ist – deren qualitätsgesicherter Betrieb letztendlich das zentrale Ziel der Infrastrukturinvestitionen ist – kommt dem Betriebsprogramm ebenfalls eine dominierende Bedeutung zu. Aktuelle Ansätze sprechen von „**fahrplanbasiertem Infrastrukturausbau**“, in denen der Fahrplan eine prägende Kenngröße zur Entscheidungsfindung liefern soll, wo und in welcher Form im Eisenbahnnetz in Infrastruktur investiert werden soll.

Die Zuverlässigkeit oder besser Unzuverlässigkeit des Systems Bahn wird vielfach falsch eingeschätzt. Um Aussagen über die Ist-Situation zu gewinnen, wurden im Rahmen eines Projektes die sogenannten LeiDis-Daten (Leit- und Dispositionssystem) der DB Netz AG ausgewertet. Hierdurch wurde es möglich, weitestgehend objektive Informationen über die tatsächliche Zuverlässigkeit der Bahn zu gewinnen.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in ein IT-basiertes Berechnungsmodell auf mikroskopischer Datenbasis integriert, um den aktuellen Betriebsablauf der Bahn simulativ nachzubilden. Ein Vergleich zwischen Realität und Simulation

(Stresstest) zeigt, ob durch die aus LeiDis übernommenen Störungen in der Simulation die gleichen Abweichungen vom Sollfahrplan erzeugt werden wie in der Realität. Nachdem das Simulationsmodell entsprechend kalibriert wurde, können auch Aussagen für Modifikationen an der Infrastruktur durch weitere Stresstests gewonnen werden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde auf einer hochgenauen Datenstruktur gearbeitet, die sekundengenaue Ergebnisse ermöglicht. Untersuchungen für den BVWP erfolgen bislang auf einer makroskopischen Ebene, die eine nicht so exakte Modellierung zulässt.

Zur Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Zuverlässigkeit (Ergebnisgröße) sowie als Eingangsgrößen die Eisenbahninfrastruktur, das Betriebsprogramm und andere Faktoren erfolgt im Projekt eine statistische Analyse für einzelne Netzelemente. Hierzu wird grundsätzlich zwischen Strecken und Bahnhöfen in der Realität, bzw. Kanten und Knoten im Modell unterschieden. Die Datenbasis der statistischen Analyse ergibt sich aus den Ergebnissen realistischer Eisenbahnbetriebssimulationen.

Die Zuglaufdaten werden auf ihre Abweichung vom Fahrplan hin untersucht und als Störungsverteilung an die Betriebssimulation übergeben. Die Eisenbahnbetriebssimulationen werden für diverse Beispielnetze durchgeführt, die so gewählt sind, dass die abgeleiteten funktionalen Zusammenhänge auf die im Rahmen der anstehenden BVWP betrachteten Netzelemente übertragen werden können. Hierfür kommt das in der Praxis bewährte und anerkannte Fahrplantrassen- und Infrastrukturmanagementsystem RailSys zum Einsatz, das vom Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb (IVE) der TU Braunschweig mitentwickelt wurde.

Das Programmsystem RailSys¹ dient u.a. der Analyse, Planung und Optimierung von Betriebsanlagen und -abläufen spurgeführter Verkehrssysteme. RailSys arbeitet in der Regel auf mikroskopischer Datenbasis, so dass alle Gleise, Weichen und Signaleinrichtungen sowie die Sicherungslogik detailliert abgebildet werden können. Hierdurch ist es möglich, die Fahrbeziehungen der Züge untereinander auf der Strecke, aber auch in den Bahnhöfen nach Ort und Zeit exakt zu bestimmen. Durch dieses Verfahren lassen sich im Gegensatz zu makroskopischen Verfahren u. a. einzelne Konflikte zwischen zwei oder mehr Fahrten belastbar und detailliert ermitteln. Es ist somit möglich, dass nicht nur quantitative Kapazitätsbelastungen ermittelt werden können, sondern auch qualitative Aussagen zum herangezogenen Gefüge aus Infrastruktur und Fahrplan getroffen werden.

¹ RailSys® ist ein eingetragenes international geschütztes Markenzeichen.

Für die Abbildung der Zuverlässigkeitsfunktion, d. h. der Zuverlässigkeitsänderung in Sekunden, legen die Analysen die Verwendung der Normalverteilung mit den Parametern μ (Mittelwert) und σ (Standardabweichung) nahe.

Die Normalverteilung hat die Dichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Ausgangspunkt sind dabei jeweils die Angebotskonzepte:

- Schienengüterverkehr
 - Einzelwagenverkehr
 - Ganzzüge und Kombierter Verkehr
- Personenfernverkehr
 - ICE
 - IC/EC
- Schienenpersonennahverkehr
 - „Schneller SPNV“, der die Kategorien FernExpress-Züge und Regional-Express umfasst
 - „Langsamer SPNV“, der die Kategorien RegionalBahn, S-Bahnen beinhaltet.

Als empirisch wichtige Variable haben sich dabei die Indikatoren Streckenauslastung, Blocklänge, Sicherungssystem und Knotentyp erwiesen. Die Auswahl der Variablen erfolgte empirisch und nach eisenbahnbetrieblicher Plausibilisierung.

Die Zuverlässigkeit ist für Kanten in Sekunden pro km definiert. Vor einer Verwendung müssen Mittelwert und Standardabweichung entsprechend mit der Länge der Kante multipliziert werden. Die resultierende Verteilung ist wiederum normalverteilt.

Bei der Bildung von **Routen** (d.h. einer Abfolge von Knoten und Kanten) ist die Faltung der Verteilungen über alle betrachteten Knoten und Kanten erforderlich.

Es wird generell die Verwendung der Annahme stochastischer Unabhängigkeit empfohlen. Wie die durchgeführten Regressionsanalysen gezeigt haben, ist der Zusammenhang zwischen Einbruchsverspätung und Zuverlässigkeitsänderung nur schwach ausgeprägt, so dass der eventuelle Fehler dieser Vereinfachung akzeptabel erscheint.

Bei stochastischer Unabhängigkeit gilt für die Faltung:

- die resultierende Zufallsgröße ist normalverteilt, mit
- dem Mittelwert: $\mu_n = \sum_{i=1}^n \mu_i$ und
- der Standardabweichung: $\sigma_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}$

wobei i Knoten und/oder Kanten und n die Anzahl der auf der Route vorkommenden Knoten/Kanten darstellen.

Im Rahmen der Analyse wurde der Einfluss infrastruktureller Variablen, des Betriebsprogramms und der Auslastung auf die Zuverlässigkeit untersucht. Dabei zeigte sich generell ein geringes Bestimmtheitsmaß aller Einflussgrößen, insbesondere auch der infrastrukturellen Variablen auf die Zuverlässigkeit. Dieser tendenziell geringe Einfluss kann damit erklärt werden, dass bei einer gegebenen Infrastruktur Fahrpläne bzw. das Betriebsprogramm auf die Möglichkeiten der Infrastruktur abgestimmt werden. Durch die in den geplanten Zugtrassen eingebauten Zeitzuschläge ist ein bestimmtes Maß an Verspätungsabbau bei jeder Verspätung ohne Einfluss der Infrastruktur möglich. Außerdem sind zwischen zwei Fahrplantrassen Pufferzeiten eingeplant, so dass eine (geringfügige) Verspätung nicht von einem Zug auf den Folgenden übertragen wird. Durch ein gut konstruiertes Betriebsprogramm oder ein Mischungsverhältnis der Züge, das die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Züge berücksichtigt, kann ein entscheidender Beitrag zur Zuverlässigkeit geliefert werden.

Es zeigt sich, dass ein stärker verspäteter Zug oftmals dispositiv auf einer Trasse eines anderen Zuges geführt wird und einen Untersuchungsabschnitt ohne Verspätungszunahme durchfahren kann. Gleiches gilt auch für verfrühte Güterzüge, sie fahren meist ebenfalls auf einer anderen Trasse ohne Veränderung der Verspätung durch einen Untersuchungsbereich. Entsprechende Effekte und Dispositionen aus dem realen Eisenbahnbetrieb können nur mit einem mikroskopischen, synchronen Simulationstool nachgebildet werden. Es zeigt aber auch, dass fahrplanunabhängige Systeme diese Effekte nicht abbilden können.

Wenn durch beliebige Ereignisse die Zugfahrten so verspätet werden, dass weder Zeitzuschläge noch Pufferzeiten die Verspätungsübertragung verhindern können, werden Zugfahrten in der Realität und im Simulationsmodell verspätet. Erst jetzt kommt es – zumindest auf hochbelasteten Strecken – zu einer Verspätungsübertragung und einem Aufbau von Verspätungen.

Hier wurden verschiedene Ansätze der Infrastrukturmodifikation wie Blockverdichtung, Erhöhung der Streckengeschwindigkeit, Verbesserung der Überholmöglichkeiten oder Verringerung niveaugleicher Kreuzungen durch Überwerfungsbauwerke in der Simulation auf ihren Einfluss zur Steigerung der Zuverlässigkeit untersucht.

Die Blockverdichtung bewirkt eine Zunahme der Pufferzeiten und damit eine Verringerung der Verspätungsübertragung. Gleichzeitig erlaubt eine solche Möglichkeit in der Regel eine Erhöhung der Zugzahlen. Sobald diese Möglichkeit jedoch genutzt wird, geht der positive Effekt der größeren Pufferzeiten wieder verloren. Eine Blockverdichtung ausschließlich zur Erhöhung der Zuverlässigkeit wird kaum eintreten, da die gewonnene Kapazität sicherlich genutzt wird.

Eine reine Erhöhung der Streckengeschwindigkeit vergrößert die Geschwindigkeitsschere und führt damit in der Regel ebenfalls nicht zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit. Eine Erhöhung der Streckengeschwindigkeit durch Abbau von Geschwindigkeitseinbrüchen führt hingegen zu einer Harmonisierung des Verkehrs und damit zu einer höheren Zuverlässigkeit.

Die Verbesserung der Überholmöglichkeiten erhöht die Flexibilität in der Disposition. Überholungen können bedarfsgerechter geplant und im Betrieb flexibler angeordnet werden. Allerdings muss beachtet werden, dass Züge, die nur von Überholung zu Überholung fahren, keine marktfähigen Reisegeschwindigkeiten erreichen und kommerziell nicht geplant werden sollten.

Eine weitere wirksame Maßnahme zur Steigerung der Zuverlässigkeit ist die Verringerung niveaugleicher Kreuzungen durch Überwerfungsbauwerke. Bei Überwerfungsbauwerken kann ein Betrieb deutlich flexibler geplant, aber auch disponiert werden.

Alle diese geschilderten Infrastrukturmaßnahmen sind aber bei der Konstruktion eines Fahrplans bekannt und werden auch berücksichtigt. Da der realisierte Betrieb ein Abbild der Randbedingungen der Planung ist, können sich Zuverlässigkeitsgewinne nur in beschränktem Maß ergeben.

Es zeigte sich in der gesamten Untersuchung, dass die betrieblichen Vorgaben einen stärkeren Einfluss auf die Verbesserung der Zuverlässigkeit haben, als die infrastrukturellen Verbesserungen. Es wurde klar, dass der durch einen Fahrplan determinierte Eisenbahnbetrieb die Randbedingungen der Infrastruktur bestmöglich ausnutzt und damit bereits durch die Fahrplankonstruktion – zumindest wenn sie den Vorgaben entsprechend durchgeführt wird – einen wichtigen Beitrag zur Zuverlässigkeit leistet.